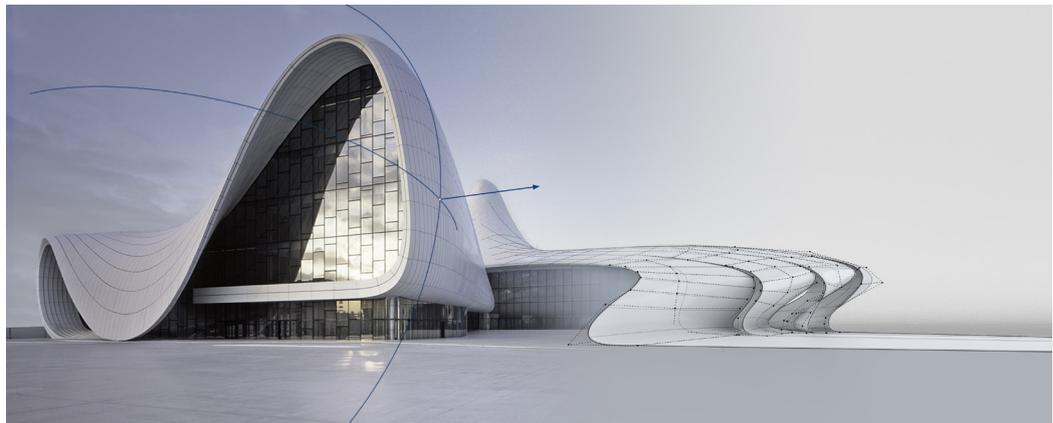
44° Convegno Internazionale
dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione
Congresso della Unione Italiana per il Disegno

# Il controllo della forma nelle superfici libere dell'architettura contemporanea

Leonardo Baglioni
Lucrezia Di Marzio

*Abstract*

L'affermarsi della forma libera come linguaggio della modernità, come espressione del pensare fluido e dinamico dell'epoca contemporanea, pone inevitabilmente in essere dei problemi in fase di progetto e di realizzazione di un'architettura. Una superfice *freeform*, infatti, prescindendo da qualsiasi legge generativa matematico–geometrica, è difficile da trasferire in un modello che permetta di gestirne le complessità. Il presente studio indaga le potenzialità e le caratteristiche degli strumenti per il controllo della forma libera oggi a disposizione del progettista, sfruttando come caso di studio la copertura del centro culturale di Baku di Zaha Hadid Architects. Il progetto in esame è stato ricostruito in ambiente digitale utilizzando le superfici di suddivisione, per indagarne le proprietà geometrico–topologiche e studiare il principio generativo della superficie, che attinge alla tendenza decisamente contemporanea di trasporre la logica di deformazione topologica al processo progettuale di architettura. Un *modus operandi* che porta indubbiamente a risultati formali accattivanti, ma che richiede ingenti risorse per soddisfare le esigenze strutturali e tecnologiche, e non si risolve nel mero utilizzo dello strumento digitale. Nonostante la trasformazione del fare e del pensare architettonico che questo induce, al progettista è ancora demandato l'orientamento coscienzioso del processo, il controllo della qualità e il vaglio critico della soluzione formale.

*Parole chiave*
architettura contemporanea, forma libera, topologia, pannellizzazione, *subdivision surface*

Le superfici libere del Centro Culturale Heydar Aliyev di Zaha Hadid in una rilettura con le *sub–d* (elaborazione grafica degli autori).



doi.org/10.3280/oa-1016-c324

## La ricerca formale nel progetto di superfici complesse

Se progettare significa, nel suo atto più intimo e atavico, definire configurazioni che attribuiscono significato e funzione ad uno spazio, appare evidente il legame indissolubile tra la riflessione sulla forma e la riflessione sul progetto. Poiché la forma, intesa come il connubio di materia, immagine e linguaggio, è esprimibile soltanto attraverso un modello, gli strumenti che permettono di controllarla e rappresentarla si pongono agli estremi del processo progettuale, diventandone incipit ed epilogo.

L'introduzione di strumenti di modellazione digitale, assieme al progresso della tecnica e l'ampliamento delle possibilità costruttive, ha permesso di indirizzare la ricerca architettonica contemporanea verso un'estetica della superficie libera, per la quale si intende una configurazione formale non riconducibile alle classificazioni tradizionali della geometria, che assurge ad un'espressività plastica svincolata da leggi di natura matematica [1].

Nel panorama della produzione architettonica contemporanea sono riconoscibili alcuni indirizzi prevalenti nell'approccio al progetto di forma libera, che si differenziano per le modalità con cui questa viene ricercata, in virtù delle quali è possibile ipotizzarne una classificazione in quattro grandi categorie: *form shaping*, ossia un approccio scultoreo alla definizione della forma; *form aggregation*, inteso come risultato di un processo di aggregazione di porzioni di geometrie note, che attingono però ad un'espressività globale 'libera'; *form improving*, approccio che media tra la definizione a priori della forma e la sua ottimizzazione secondo criteri di natura costruttivo–strutturale; *form finding*, che pone la forma come risultato ottimale della parametrizzazione del problema progettuale (fig.1).

A prescindere dalla modalità di ricerca formale, denominatore comune dei progetti di superficie complesse è la definizione di un modello, che può essere anche fisico, ma nella quasi totalità dei casi è oggi un modello digitale. Non mancano nella storia recente esempi di progetti di forma libera in cui la ricerca formale scaturisce da modelli analogici, dagli esperimenti di Frei Otto sulle lamine di sapone ai progetti di Musmeci di grandi strutture (fig. 2). Si tratta tuttavia di casi straordinari che scaturiscono dal limite oggettivo dei modelli grafici tradizionali che non sono in grado di controllare, e cioè rappresentare, l'andamento delle superfici minime. Lo strumento di modellazione digitale dispiega e rende largamente accessibili invece nuove potenzialità espressive, in quanto permette il controllo del dinamismo e della plasticità alla dimensione architettonica, e quindi di trasferire l'immagine mentale in un modello che non perde la ricchezza della complessità formale.

FORM SHAPING

FORM AGGREGATION

FORM IMPROVING

FORM FINDING

Fig. 1. Classificazione delle tendenze di ricerca nel progetto di forma libera. In alto a sinistra: Zaha Hadid Architects, Stazione funicolare di Innsbruck (IngolfBLN, CC BY-SA 2.0, via Wikimedia Commons); in alto a destra: Le Corbusier, Padiglione Philips, Bruxelles; in basso a sinistra: Toyo Ito & Associates, Meiso no Mori Municipal Funeral Hall, Kakamigahara (yuco, CC BY-SA 2.0, via Flickr); in basso a destra: Sergio Musmeci, Ponte sul Basento, Potenza (Giorgio L. Rutigliano, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia).

Fig. 2. Confronto tra il modello in lamina di sapone realizzato da Otto per il Padiglione della Danza a Colonia e la ricostruzione del padiglione in ambiente digitale sfruttando motori di simulazione della fisica (*relaxation method*). Il modello digitale è stato ricostruito con il solo scopo di indagare le proprietà dei simulatori di particelle, pertanto non rispecchia le condizioni di vincolo e carico effettive della struttura realizzata da Otto. (In alto a sinistra una foto del padiglione reale, © Raimond Spekking / CC BY-SA 4.0 / via Wikimedia Commons; in basso un'elaborazione degli autori).

## Un caso studio: Centro Culturale Heydar Aliyev, Zaha Hadid Architects

Nel panorama dell'architettura contemporanea, lo studio di Zaha Hadid occupa un posto privilegiato nel processo di slittamento dal pensiero analogico a quello digitale. Esempio paradigmatico è il Centro Culturale Heydar Aliyev a Baku, un complesso polifunzionale avvolto da un'unica copertura continua, che si inserisce come elemento di rottura nel paesaggio urbano e ne afferma l'emancipazione dalla rigida architettura del precedente dominio sovietico.
Il processo che ha portato a definire la forma libera della copertura è frutto dell'ibridazione di differenti tecnologie e strumenti. Alla base dell'iter progettuale risiedono ancora il disegno manuale e lo schizzo, che vengono poi trasformati in un modello digitale. Il calcolatore è utilizzato fin dalla prime fasi del processo, in un rapporto con i modelli analogici che non è però unilaterale. La tecnologia contemporanea consente infatti un flusso di lavoro estremamente flessibile, perché permette il controllo e la verifica del progetto in una trasformazione continua dei modelli dallo spazio virtuale a quello reale e viceversa (fig. 3). Come è possibile dedurre dall'intervista condotta da Chaos Group al *lead designer* di ZHA [Winchester 2019], la superficie libera della copertura è stata definita fin dall'inizio con l'ausilio di superfici di suddivisione, all'interno di software che consentono di coordinare le fasi di progetti di grandi dimensioni e complessità con rapidità e precisione. L'utilizzo del calcolatore è stato infatti fondamentale per allacciare il progetto della forma con quello della sua struttura, oltre che per l'ottimizzazione della maglia esterna del telaio, condotta secondo un procedimen-

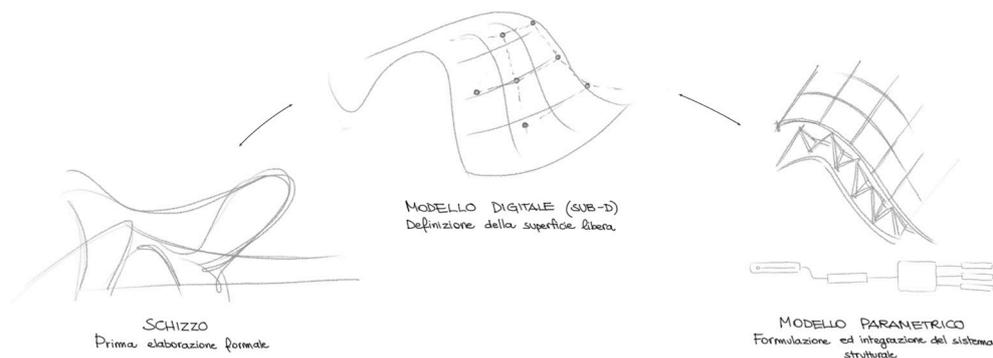
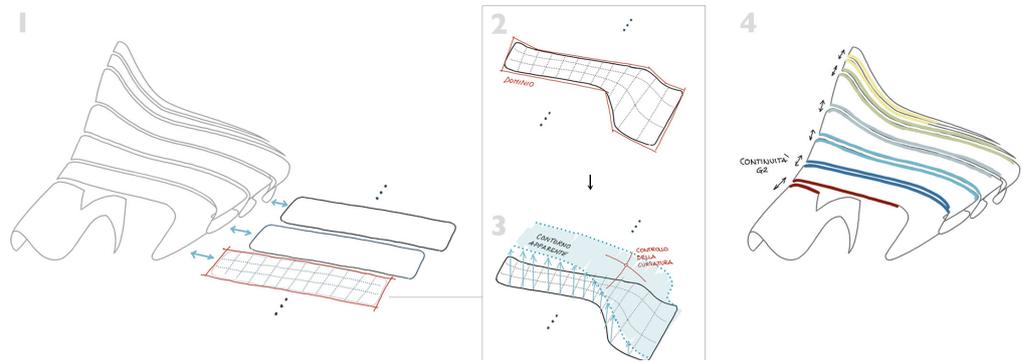



Fig. 3. Schema del processo progettuale reversibile e flessibile adottato dallo studio Hadid (elaborazione grafica degli autori).

Fig. 4. Progetto di costruzione del modello della copertura in ambiente informatico (elaborazione grafica degli autori).

to geometrico ideale in termini di dimensionamento dei moduli della maglia e di orientamento dei raccordi tra gli elementi che compongono la copertura.

## Ricostruzione del modello della copertura: analisi e rappresentazione

Con l'obiettivo di individuare gli strumenti con i quali è possibile gestire le superfici di forma libera e interpretare l'approccio progettuale di Hadid, è stata quindi condotta la costruzione di un modello della copertura. La ricostruzione ha consentito di rintracciare le qualità geometriche che definiscono una superficie libera, comprendere l'influenza esercitata dagli strumenti di modellazione sul processo di definizione della forma e confrontare la superficie di progetto – geometricamente ideale – con quella costruita e quindi discretizzata.
Il modello ricostruttivo è stato progettato partendo dalla suddivisione della superficie in porzioni topologicamente riconoscibili e omeomorfe ad un piano. Dopo averne definito il dominio, ognuna di queste è stata deformata, con l'ausilio del contorno apparente nelle sue rappresentazioni piane, controllando principalmente le caratteristiche di curvatura e topologiche. Infine, sono state individuate delle porzioni di dominio da porre in continuità di curvatura, in modo da ripristinare la continuità originaria della superficie (fig. 4).
Analizzando le caratteristiche formali ed espressive della copertura, è deducibile come alla base della ricerca progettuale risiedano i principi della logica topologica. Il progetto si inserisce in quella parte della pratica architettonica che ha oggi spostato la sua attenzione sul corpo elastico, deformato e dinamico, definito tramite l'impiego di sistemi geometrici flessibili e malleabili che non trovano più fondamento e regola nel concetto di misura e proporzione. Il momento di ricerca formale si sgancia così da considerazioni di carattere metrico, lasciando emergere gli aspetti topologici dello spazio [2] come caratteri espressivi dell'architettura. L'immagine costruita è infatti una forma sinuosa che si curva liberamente, variando in modo continuo, e che origina dalla deformazione plastica del terreno (fig. 5). Un iter progettuale di questo tipo è concesso e agevolato da alcuni strumenti contemporanei per il controllo della

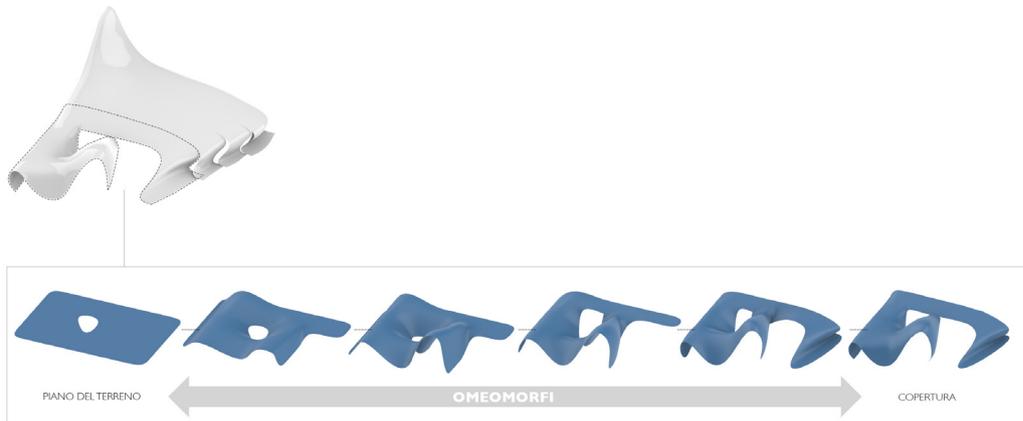



Fig. 5. Ricostruzione del processo di deformazione topologica che rende la copertura del centro culturale di Baku il prodotto finale di una trasformazione continua del terreno (elaborazione grafica degli autori).

Fig. 6. Processo di suddivisione secondo l'algoritmo di Catmull–Clark applicato ad un cubo. In sole quattro iterazioni si ottiene una superficie sufficientemente liscia (elaborazione grafica degli autori).

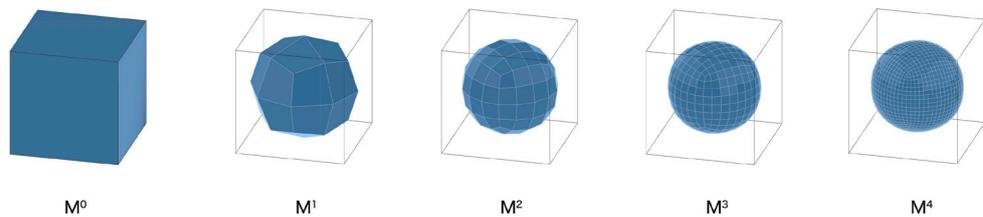
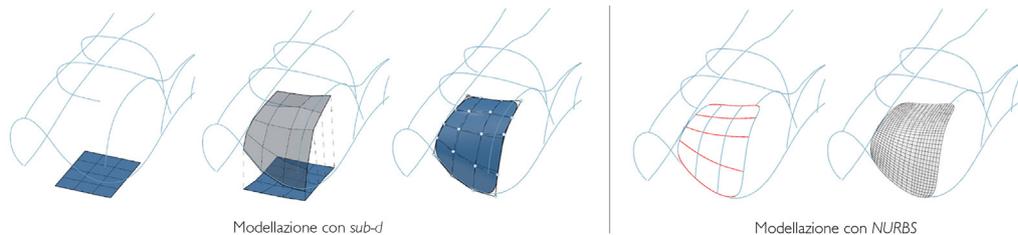



Fig. 7. Confronto tra l'approccio di modellazione matematico con NURBS e l'approccio di modellazione scultoreo con *sub–d* (elaborazione grafica degli autori).

forma, tra i quali si distinguono le superfici di suddivisione. Le *sub–d*, dall'inglese '*subdivision surfaces*', rappresentano nella computer grafica un'ibridazione tra la modellazione numerica e quella matematica, sintetizzando in un unico oggetto alcuni benefici dell'una e dell'altra modalità di rappresentazione. Possono essere definite come il risultato limite dell'applicazione reiterata di un algoritmo di suddivisione a partire da un poliedro più grossolano [3], e nascono con l'obiettivo di realizzare superfici complesse, dall'aspetto levigato, utilizzando un numero ridotto di elementi di controllo. Tra gli svariati schemi di suddivisione ad oggi esistenti, il più utilizzato è quello di Catmull–Clark, che permette, a partire da un poliedro a topologia arbitraria, di generare suddividendo ogni faccia del poliedro una superficie limite costituita interamente da quadrangoli [4]. In teoria, il processo andrebbe iterato all'infinito, ma nella pratica è sufficiente un numero molto limitato di applicazioni per ottenere una superficie liscia (fig. 6). Le *sub–d* sono strumenti particolarmente flessibili, utilizzate dal settore dell'animazione a quello delle forme libere in architettura, in grado di superare i limiti di discontinuità delle NURBS. Queste ultime possono rappresentare infatti soltanto superfici topologicamente equivalenti ad un piano, un cilindro o un toro: le geometrie complesse vengono quindi risolte tramite un *patchwork* di pezze e prevedono l'impostazione di una rete di curve orientata, che non garantisce però la continuità di curvatura G2 alle cuciture. L'approccio deformativo-scultoreo delle *sub–d* consente invece di rappresentare oggetti a topologia arbitraria in modo molto intuitivo, perché parte da un poliedro di controllo successivamente raffinato, la cui continuità è garantita per definizione (fig. 7).
È necessario sottolineare però che anche le superfici di suddivisione presentano dei limiti topologici, che risiedono nell'impossibilità di assicurare la continuità di curvatura nei punti straordinari. Nella costruzione del modello della copertura, il problema è stato affrontato realizzando una *sub–d* unica che eliminasse i punti straordinari dalle porzioni interessate, ma che approssimava in modo molto più grossolano l'andamento della superficie reale. Il modello è stato quindi convertito da *sub–d* a NURBS e deformato tramite una gabbia di controllo che, mantenendo la posizione dei punti in prossimità del resto della superficie, permettesse la trasformazione e garantisse al contempo la continuità ricercata (fig. 8).

## La razionalizzazione della forma libera

Il progetto della forma libera pone in essere delle difficoltà innegabili nel momento della sua realizzazione. Si rende quindi necessario il cosiddetto processo di 'razionalizzazione', inteso come modifica della geometria allo scopo di facilitare e migliorare la costruibilità del progetto, e che si traduce quindi in un processo di ottimizzazione a priori o a posteriori. Nel primo caso, la razionalizzazione diventa un problema di progetto della superficie, la cui definizione formale viene assoggettata all'imposizione di vincoli di varia natura, da quella statica alle esigenze dettate dalla produzione industriale. Nel secon-

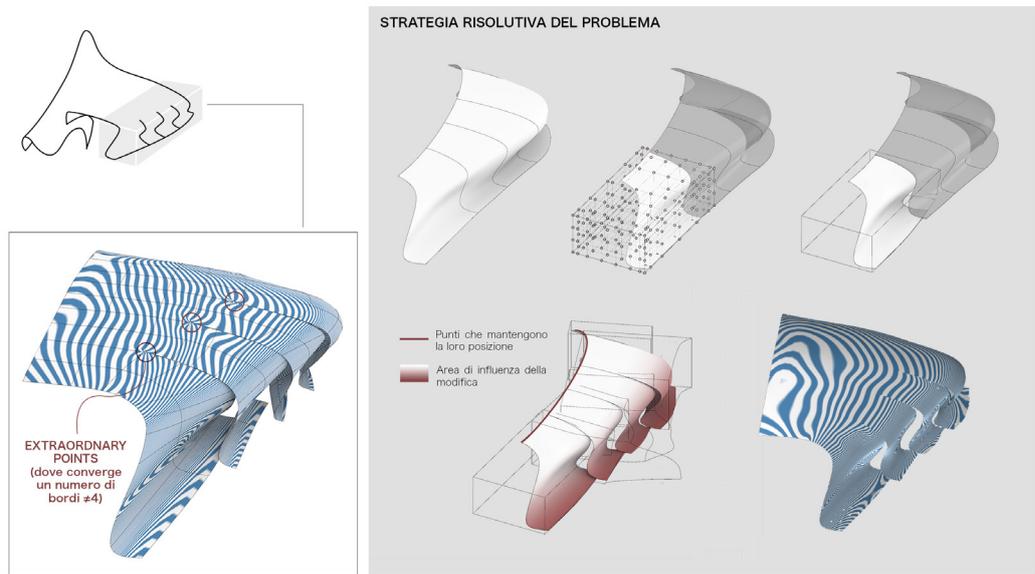



Fig. 8. Strategia risolutiva adottata per assicurare la continuità di curvatura nei punti straordinari (elaborazione grafica degli autori).

do caso il problema è invece di approssimazione, perché prende come dato di input una forma iniziale definita e studia un sistema discreto di elementi in grado di approssimarla. Nel corso degli anni sono state sviluppate varie tecniche di pannellizzazione delle forme libere, le quali si differenziano in relazione alla capacità di soddisfare i requisiti di economia, fattibilità, e aderenza alla geometria di progetto. Per la discretizzazione della copertura del centro culturale è stata adottata una maglia di pannelli quadrangolari in GRC, piani, a singola curvatura e a doppia curvatura, quasi tutti pezzi unici realizzati in stampi flessibili. La razionalizzazione è stata quindi condotta con l'obiettivo di approssimare nel modo più fedele possibile la superficie di progetto, massimizzando la resa estetico–formale a scapito dei costi di produzione (fig. 9).
Per porre rimedio alle difficoltà costruttive ed economiche che un progetto di forma libera impone – nel caso frequente in cui l'ingegnerizzazione non è parte stessa della definizione della forma – la ricerca contemporanea è in parte concentrata sullo sviluppo di software di

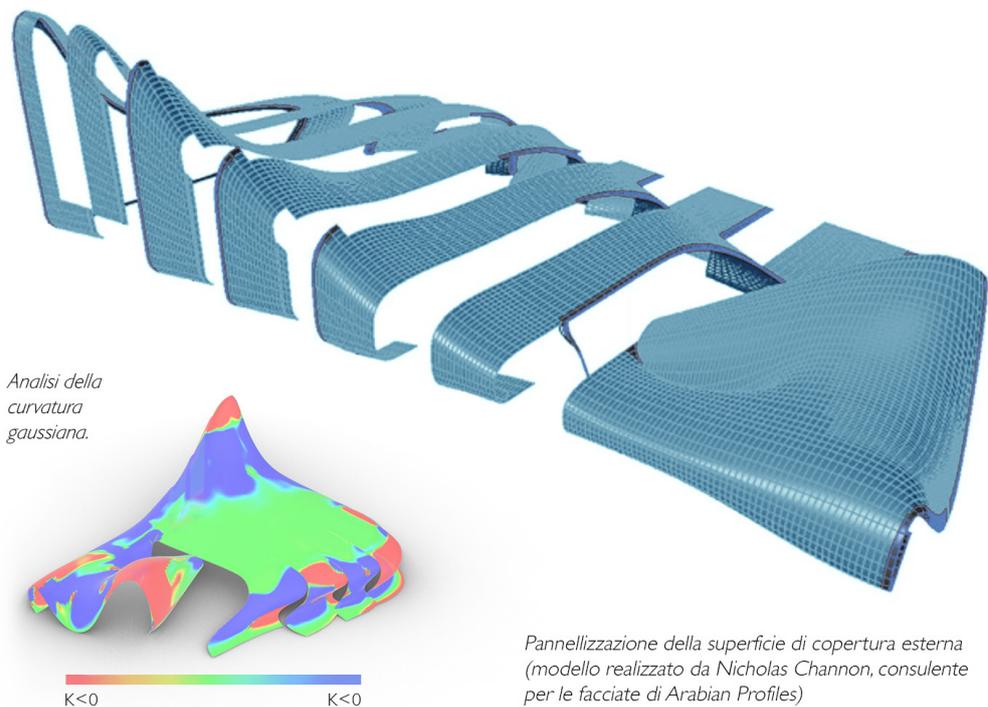



Fig. 9. Pannellizzazione della superficie esterna della copertura a confronto con l'andamento della curvatura gaussiana della superficie (in alto a destra, modello realizzato da Nicholas Channon, consulente per le facciate di Arabian Profiles; in basso a sinistra un'elaborazione grafica degli autori).

| concrete | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| cost/mold | 0 | 6 | 8 | 8 | 8 |
| cost/panel | 1 | 4 | 5 | 5 | 5 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| molds | - | 58 | - | 12 | 280 | 2 |
| panels | 229 | 1592 | - | 53 | 524 | 2 |

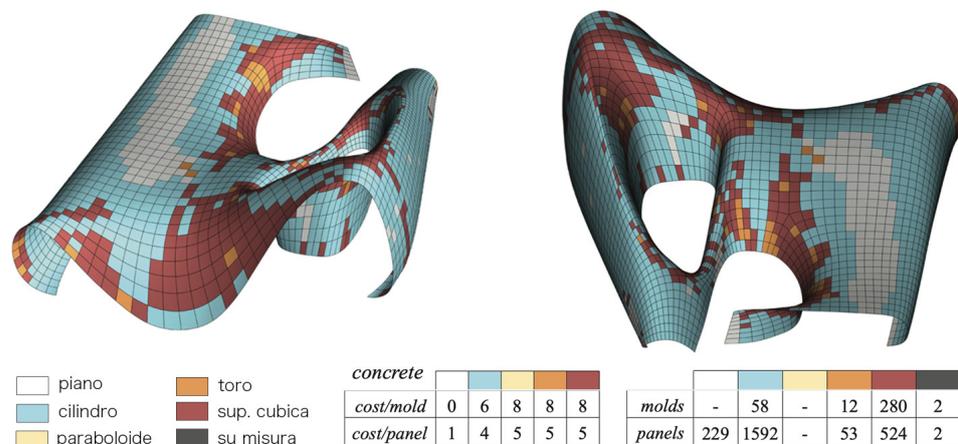
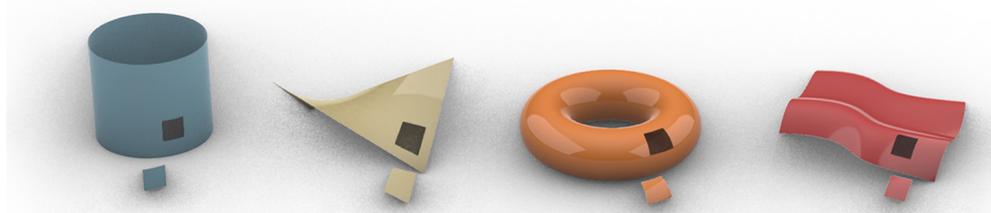



Fig. 10. Applicazione dell'algoritmo di ottimizzazione sulla superficie interna del centro culturale di Baku [Eigensatz 2010, fig. 9] (in basso un'elaborazione grafica degli autori).

ottimizzazione dei sistemi di pannelli. Questi algoritmi, filtrati dalla capacità critica del progettista, cercano una soluzione di compromesso tra le necessità di minimizzare i costi di produzione e la deviazione dalla superficie data, garantendo al contempo la qualità della pannellizzazione (fig. 10).

## Conclusioni

Gli strumenti per la realizzazione di modelli digitali consentono di gestire in modo intuitivo la complessità geometrica, permettendo il dialogo con forme sempre più arbitrarie e personalizzabili. L'avanzamento delle tecnologie nella realizzazione di modelli ha quindi influenza diretta sul processo di definizione della forma, facilitando il momento creativo–compositivo e trasferendovi il dinamismo e la deformazione insita negli strumenti. Lo studio del caso di esempio mostra però come il progetto della forma libera, protratto secondo le modalità descritte, faciliti da una parte il controllo formale e aumenti dall'altra le difficoltà legate alla fase realizzativa: aumenta quindi la discrasia tra la concezione geometrica della forma e la sua ingegnerizzazione. La sfida di oggi è quindi quella di risolvere un problema multidisciplinare, che si esplica nel rapporto tra geometria e struttura, ma anche e soprattutto nella relazione tra la forma e il suo significato. Tra gli obiettivi del progettista, fondamentale è quello di disegnare forme di qualità, ossia esteticamente valide ed apprezzabili, perché al significato formale sono connessi valori culturali, sociali e simbolici, che rendono l'architettura espressione indelebile del proprio tempo. Prima di qualsiasi esigenza distributiva, funzionale, costruttiva, un progetto nasce nello spazio della mente come immagine: la trasformazione indotta dagli strumenti di modellazione digitale è quella che porta uno spazio della mente tradizionalmente legato alle coordinate cartesiane a trasformarsi in un luogo definito da forze e moto. Si tratta una vera e propria rivoluzione, di un pensare dinamico, che vede nella topologia la matrice genetica della ricerca formale. Il progetto, già nella sua concezione embrionale, si svincola da quantità e distanze, generandosi a partire dalla deformazione. Il controllo qualitativo avviene quindi intervenendo sulla curvatura di una superficie, punto per punto: da questa dipendono infatti riflessione e ombreggiatura, caratteristiche che permettono di apprezzare visivamente qualsiasi realtà materica. Si tratta di un approccio tipico del design, trasposto nelle sue logiche essenziali e nei suoi principi metodo-

logici alla scala dell'architettura, e agevolato dall'utilizzo delle *sub–d*, perché consentono di governare forme complesse mantenendo un grafico di curvatura liscio e continuo. Lo strumento digitale è quindi senza dubbio mezzo necessario a controllare la complessità delle *free–form*, ma non sufficiente a garantirne la qualità, per la quale la ricerca formale, in termini estetici, simbolici ed espressivi, è ancora inevitabilmente demandata alla sensibilità del progettista.

### Note

[1] La matematica classifica le superfici libere all'interno delle invarianti complesse, sottolineandone nella definizione l'assenza di simmetrie traslazionali o rotazionali, e quindi l'impossibilità di ricondurle a relazioni o trasformazioni codificate.

[2] Sono proprietà topologiche ad esempio la condizione di frontiera o confine, di interno–esterno, apertura e chiusura, connessione, orientabilità.

[3] $\sigma = \lim_{n \to \infty} M^n$ dove σ è la superficie di suddivisione, $M^n$ è l'n–esima *mesh* di controllo sottoposta a suddivisione e n il numero di iterazioni della suddivisione.

[4] La suddivisione si traduce quindi nella definizione di nuovi vertici, computati sulla base di una media ponderata che considera la posizione dei vertici iniziali e dati relativi alle facce e agli spigoli.

### Crediti

Nella condivisione generale della metodologia e dei contenuti presentati, Leonardo Baglioni si è occupato dell'impostazione generale della ricerca, Lucrezia Di Marzio si è occupata del suo sviluppo e della fase sperimentale.

### Riferimenti bibliografici

De Luca F. (2006). *Modelli architettonici: Dagli strumenti della progettazione alla progettazione degli strumenti. Il modello come strumento progettuale in ambito digitale informatico*. Tesi di dottorato in Composizione Architettonica, tutor prof. Antonino Saggio. Università degli Studi di Roma La Sapienza.

DeRose T., Kass M., Truong T. (1998). Subdivision Surfaces in Character Animation. In *ACM SIGGRAPH 98. Electronic Art and Animation Catalog. Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 85-94. New York, USA: Association for Computing Machinery.

Dragišić M., Bnin-Bninski A. (2017). The application models of the topological principle of continuous deformation in the architectural design process. In *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering*, vol. 15, n. 3, pp. 453-464.

Eigensatz M., Kilian M., Schiftner A., Mitra N.J., Pottmann H., Pauly M. (2010). Paneling Architectural Freeform Surfaces. In *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, 4, pp. 1-10.

Emmer M. (a cura di). (2005). *Matematica e cultura*. Milano: Springer.

Froli M., Tonelli D. (2014). Progettare involucri di forma libera: l'ingegnerizzazione dell'involucro. In *Costruzioni Metalliche*, vol. LXVI, n. 3, pp. 44-55.

Harada T., Yoshimoto F., Moriyama M. (1999). An aesthetic curve in the field of industrial design. In *Proceedings 1999 IEEE Symposium on Visual Languages. Tokyo, 13-16 September 1999*, pp. 38-47. Piscataway: IEEE.

Liao W., Li T., Liu H. (2017). *Subdivision Surface Modeling Technology*. Singapore: Springer Singapore.

Migliari R. (a cura di). (2004). *Disegno come modello: Riflessioni sul disegno nell'era dell'informatica.* Roma: Edizioni Kappa.

Pottmann H., Asperl A., Hofer M., Kilian M. (Eds.). (2007). *Architectural Geometry*. Bentley Institute Press.

Sanchez-Alvarez J. (2010). Practical aspects determining the modelling of the space structure for the free-form envelope enclosing Baku's Heydar Aliyev Cultural Centre. In A. Domingo, C. Lazaro (Eds.). *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. Valencia 28 September - 2 October 2009*, p. 1263-1274. Valencia: Universitat Politècnica de València.

Tellier X. (2020). *Morphogenesis of curved structural envelopes under fabrication constraints*. Tesi di dottorato in Science, Ingénierie et Environnement, tutor prof. H. Pottman. Université Paris-Est.

Tonelli D. (marzo 2012). *Sinossi sull'ingegneria delle forme libere*. <http://www2.ing.unipi.it/griff/files/Sinossi.pdf > (consultato il 29 gennaio 2023).

Winchester H. (15 ottobre 2019). *Zaha Hadid Architects on the tech behind its iconic designs*. <https://www.chaos.com/blog/zaha-hadid-architects-on-the-tech-behind-its-iconic-designs> (consultato il 29 gennaio 2023).

Autori
*Leonardo Baglioni*, Sapienza Università di Roma, leonardo.baglioni@uniroma1.it
*Lucrezia Di Marzio*, Sapienza Università di Roma, dimarzio.lucrezia@gmail.com

*Per citare questo capitolo*: Baglioni Leonardo, Di Marzio Lucrezia (2023). Il controllo della forma nelle superfici libere dell'architettura contemporanea/Formal Control for Freeform Surfaces of Contemporary Architecture. In Cannella M., Garozzo A., Morena S. (a cura di). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 793-809.

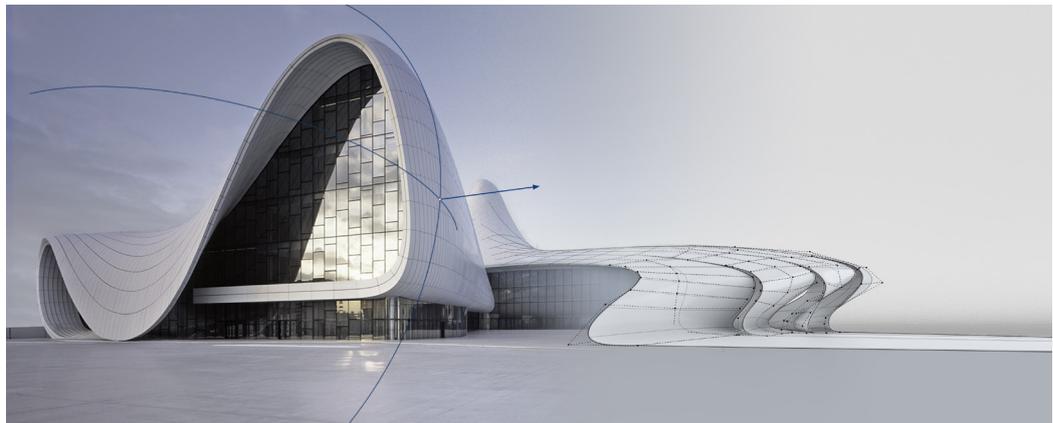
 Isbn 9788835155119

# Formal Control for Freeform Surfaces of Contemporary Architecture

Leonardo Baglioni
Lucrezia Di Marzio

*Abstract*

The emergence of freeform as the language of contemporaneity, as a valid architectonical expression of today's fluid and dynamic thinking, inevitably brings about problems within a building's planning and realization. Because freeform surfaces overlook any mathematical or geometrical generative law, converting them into a model that allows managing their complexity is difficult. The work aims at identifying the tools for the geometrical control of freeform shapes, by studying the case of Baku's cultural center of Zaha Hadid Architects. The case study, which conveys its expressivity through the cladding surface's fluidity, has been inspected in its geometrical and topological properties through a digital reconstruction, using subdivision surfaces as the primary tool. Furthermore, the model's construction allowed us to study the surface's generative logic, which draws from the contemporary tendency of transposing the topological deformation logic to the architectural planning process. It is a modus operandi that undoubtedly leads to captivating formal results, but at the same time needs huge resources to meet the project's technical and structural requirements, and it's not resolved in the mere utilization of the digital tool. Despite the transformation of the architectural process and thinking, caused by digital design tools, the designer is still delegated to the conscientious leading of the project, its quality control, and the careful inspection of its formal solution.

*Keywords*
contemporary architecture, freeform surfaces, topology, paneling, subdivision surface

Freeform surfaces of Heydar Aliyev Cultural Center by Zaha Hadid in a reinterpretation with sub-d (authors' elaboration)



doi.org/10.3280/oa-1016-c324

## The formal research in complex surfaces designs

If designing means, in its most intimate and atavic gesture, defining configurations that give meaning and function to a space, it appears clear the unbreakable bond between the reflection upon form and the reflection upon design. Since form, intended as the union of matter, image and language, can only be expressed through a model, the tools that allow to control it and translate it into a model inevitably stand at the design process' extremes, becoming its incipit and conclusion.
The introduction of digital modeling tools, together with the progress of technology and the extension of constructive possibilities, allowed to address contemporary architectural research towards a freeform aesthetic, by which we mean a formal configuration that cannot be included in geometry's traditional classifications, and rises to a sculptural expressivity freed from any mathematical law [1].
In today's architectural production are recognizable several types of approaches to the field of freeform design, that differ in the ways form is researched and are, according to them, classifiable into four categories: 'form shaping', namely a sculptural approach; 'form aggregation', intended as the result of the assembly of portions of known geometries; 'form improving', namely a method that mediates between an *a priori* definition of form and its optimization according to the constructive and structural criteria; 'form finding', that places form as the optimal result of the design problem's parametrization (fig. 1).
Nevertheless, apart from the formal research method, the common denominator of complex surface designs is the definition of a model, which can be physical, but in almost all cases it is today a digital model.
In recent history, there is no lack of examples of freeform projects in which the formal research springs from analogical models, from Otto's experiments on soap films to Musmeci's designs for large structures (fig. 2). However, those are extraordinary cases that arise from the objective limit of traditional models, which are unable to control, and so to represent minimal surfaces.
The tools for digital modeling instead unfold and make widely accessible new expressive potentialities, as they allow to control dynamism and plasticity at the architectural scale, and therefore transfer the mental image into a model that doesn't lose the richness of formal complexity.

FORM SHAPING

FORM AGGREGATION

FORM IMPROVING

FORM FINDING

Fig. 1. Classification of research trends in freeform design. On the top left: Hungerburg Funicular Station, Innsbruck, Zaha Hadid Architects (IngolfBLN, CC BY-SA 2.0, via Wikimedia Commons); on the top right: Philips Padillon, Bruxelles, Le Corbusier; on the bottom left: Meiso no Mori Municipal Funeral Hall, Kakamigahara, Toyo Ito & Associates (yuco, CC BY-SA 2.0, via Flickr); on the bottom right: Ponte sul Basento, Potenza, Sergio Musmeci (Giorgio L. Rutigliano, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia).

Fig. 2. Comparison between the soap foil model made by Otto for the Dance Pavilion in Cologne and the reconstruction of the pavilion in a digital environment using physics simulation engines (relaxation method). The digital model was reconstructed with the sole purpose of investigating the properties of particle simulators, therefore it does not reflect the effective constraint and load conditions of the structure built by Otto (on the top left a photo of the real pavillon, by © Raimond Spekking / CC BY-SA 4.0 / via Wikimedia Commons; on the bottom an authors' elaboration).

### A case study: Heydar Aliyev Cultural Center, Zaha Hadid Architects

Within the contemporary architecture panorama, Zaha Hadid studio has a privileged place in the shifting process from analogical to digital thinking. A paradigmatic example can be considered the Heydar Aliyev Cultural Center in Baku, a polyfunctional complex wrapped in a continuous cladding that inserts itself as a breaking element in the urban landscape and asserts Baku's emancipation from the rigid architecture of the former Soviet rule.
The process that led to the definition of the cladding freeform derives from the intersection of different tools and technologies. The hand drawing and the sketch still lie at the basis of the design iter, but they are then transformed into a digital model. Computer is used since the first steps of the process, though within a relationship between digital and analog models that isn't unilateral. Contemporary technology grants indeed an extremely flexible workflow because it allows the project's control and examination in a continuous transformation of the models from virtual to real space and vice versa (fig. 3).
The freeform of Heydar Aliyev cladding was defined from the beginning with the help of subdivision surfaces, as can be deducted from the interview by Chaos Group with the ZHA lead designer [Winchester 2019]. Indeed, the team used software that allow them to coordinate all the phases of a huge and complex project with speed and precision. Using the computer was furthermore fundamental to tie the shape design with its structure one, as well as for the optimization of the external mesh frame, carried out through an ideal geometric procedure in terms of sizing of the frame modules and orientation of the joints.

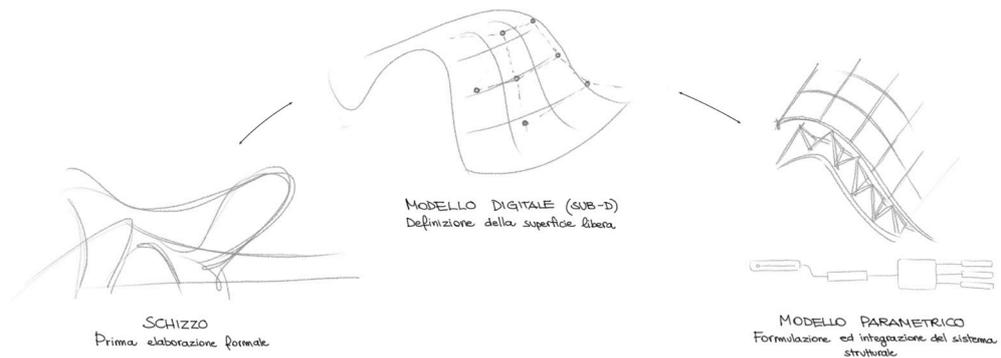
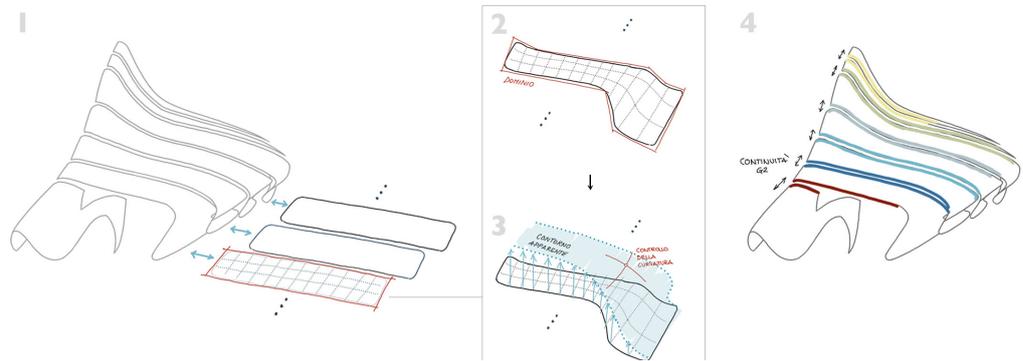



Fig. 3. Scheme of the reversable and flexible design workflow Hadid studio adopted (authors' drawing).

Fig. 4. Construction project of the cladding model in digital environment (authors' drawing).

## Reconstruction of the cladding model: analysis and representation

The construction of a model of the cladding was then carried out, in order to identify the tools that allow to manage freeform surfaces and interpret Hadid's design approach. The reconstruction made it possible to trace the geometric qualities that define a freeform surface, understand the influence exerted by modeling tools on the design process, and compare the project surface – geometrically ideal – with the build and discretized one. The reconstructive model was designed starting from the subdivision of the surface into topologically recognizable portions homeomorphic to a plane. After defining its domain, each portion was deformed – with the help of the apparent contour in the 2D representations – mainly controlling its curvature and topological characteristics. Finally, portions of the domain were identified to be placed in curvature continuity, in order to restore the original continuity of the surface (fig. 4).
The analysis of the cladding's formal and expressive properties made it possible to deduct that at ZHA's design research basis lie topological logic principles. The project is part of that section of architectural practice that has today shifted its attention to the elastic, deformed and dynamic body, defined through the use of flexible and malleable geometric systems which no longer find their basis and rule in the concept of measure and proportion. The moment of formal research thus frees itself from considerations of metric nature, allowing the topological aspects of space to emerge [2] as expressive characteristics of architecture. The built image is indeed a sinuous shape that curves freely, varying continuously, and which originates from the plastic deformation of the terrain (fig. 5). A design process of this type is granted and facilitated by some contemporary tools for controlling form, among which the subdivision surfaces stand out. Sub–d, from the English term 'subdivision surfaces', represent in computer graphics a hybridization between numerical and mathematical modeling, synthesizing in a single object some benefits of both representation methods. They can be defined as the functional limit of an iterative subdivision process that starts from a coarser polyhedron [3], and they arose to create complex

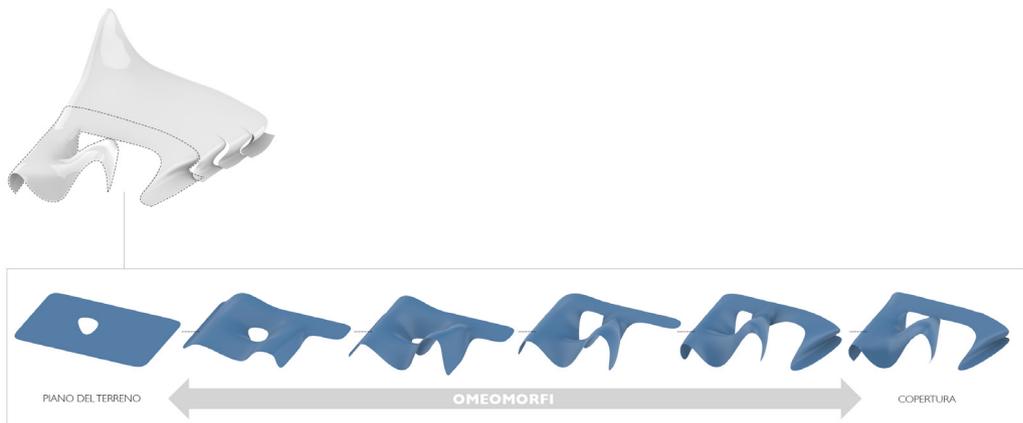



Fig. 5. Reconstruction of the topological deformation process that makes the roof of Baku's cultural center the final product of a continuous transformation of the terrain (authors' elaboration).

Fig. 6. Subdivision process according to Catmull-Clark algorithm applied to a cube. Four iterations are sufficient to obtain a smooth surface (authors' elaboration).

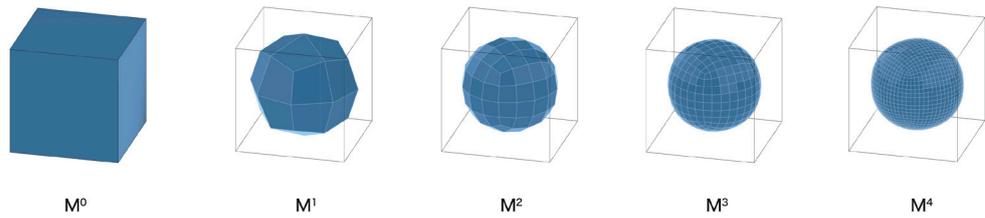
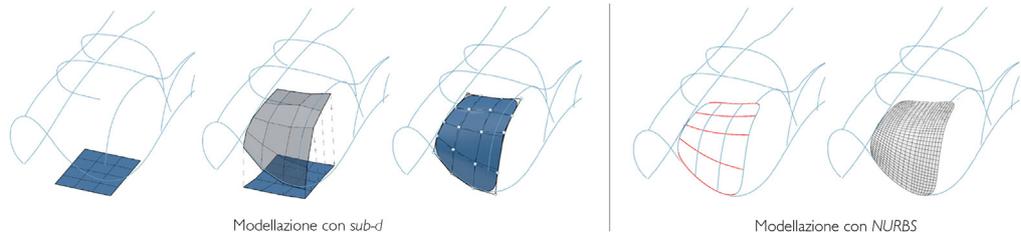



Fig. 7. Comparison between mathematical modeling approach with NURBS and sculptural modeling approach with sub-d (authors' elaboration).

smooth surfaces using a reduced number of control elements. Among the various subdivision algorithms existing today, the most used is that of Catmull–Clark, which allows, from an arbitrary topology polyhedron, to generate by subdividing each face of the polyhedron a limit surface entirely made up of quadrangles [4].
Theoretically, the process should be iterated indefinitely, but practically a very limited number of applications is sufficient to obtain a smooth surface (fig. 6). Sub–d are particularly flexible tools, used from the animation sector to that of free forms in architecture, capable of overcoming the discontinuity limits of NURBS. Indeed, the latter can only represent surfaces topologically equivalent to a plane, a cylinder, or a torus: complex geometries are therefore resolved through a and require the setting of an oriented curves network, which however does not guarantee the G2 curvature continuity at the seams. The deformative–sculptural approach of sub–d instead allows objects with an arbitrary topology to be represented in a very intuitive way, because it starts from a control polyhedron subsequently refined, whose continuity is guaranteed by definition (fig. 7).
However, it is necessary to underline that even the subdivision surfaces have topological limits, which reside in the impossibility of ensuring curvature continuity at extraordinary points. In the construction of the cladding model, the problem was tackled by creating a single sub–d that eliminated the extraordinary points from the affected portions, but approximated the trend of the real surface in a much rougher way. The model was then converted from sub–d to NURBS and deformed using a control cage that, by maintaining the position of points near the rest of the surface, would allow the transformation and at the same time guarantee the sought continuity (fig. 8).

## Freeform rationalization

A freeform project brings about undeniable difficulties in the moment of its realization. Therefore, it becomes necessary the so–called 'rationalization' process, meant as a modification of the geometry in order to facilitate and improve the project's constructability. Thus, it translates into an *a priori* or *a posteriori* optimization process. In the first case, rationalization becomes a surface design problem, where the formal definition is subjected to the imposition of various types of constraints, from static to industrial production ones. In the second case, instead, the problem is one of approximation, because it takes a definite initial form as input data and studies a discrete system of elements capable of approximating it.
Over the years, various free–form paneling techniques have been developed, which differ in the ability to meet the requirements of economy, feasibility, and adherence to the project geometry. For the discretization of the cultural center's roof, a grid of flat, single–curved and double–curved GRC quadrangular panels was adopted, almost all unique

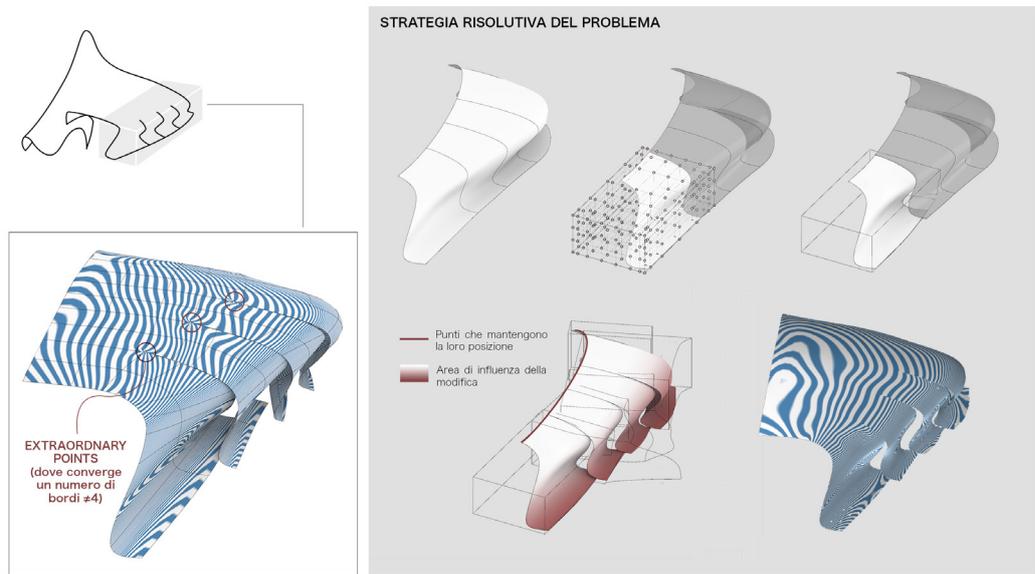



Fig. 8. Solution strategy adopted to ensure curvature continuity at extraordinary points (authors' elaboration).

pieces made in flexible molds. The rationalization was therefore carried out to approximate the project surface as faithfully as possible, maximizing the aesthetic–formal result at the expense of production costs (fig. 9).
To remedy the constructive and economic difficulties that a free–form project imposes – in the frequent case where engineering is not itself part of the shape definition – the contemporary research is partly concentrated on the development of software for panel systems optimization. These algorithms, filtered by the designer's critical capacity, seek a compromise solution between the need to minimize production costs and the deviation from the given surface, while guaranteeing the quality of the paneling (fig. 10).

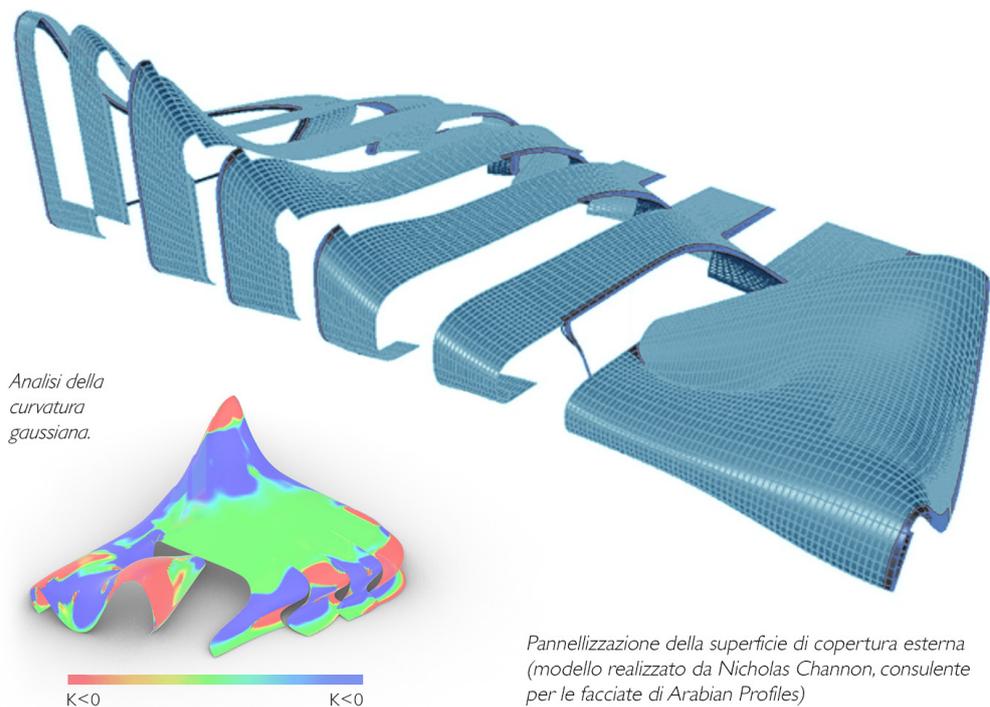



Fig. 9. The paneling of the external surface of the cladding compared with the trend of the surface Gaussian curvature (on the top right a model realized by Nicholas Channon, specialist facade consultant for Arabian Profiles; on the bottom left an authors' elaboration).

| concrete | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| cost/mold | 0 | 6 | 8 | 8 | 8 |
| cost/panel | 1 | 4 | 5 | 5 | 5 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| molds | - | 58 | - | 12 | 280 | 2 |
| panels | 229 | 1592 | - | 53 | 524 | 2 |

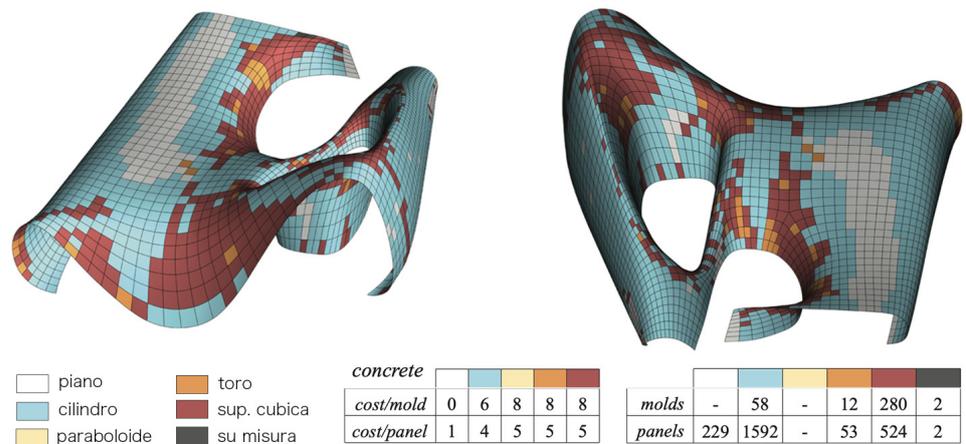
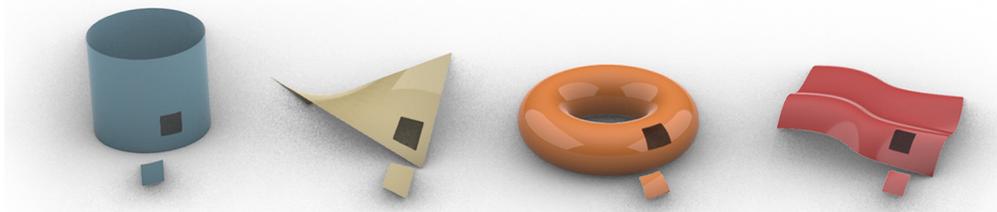



Fig. 10. Application of the optimization algorithm on the inner surface of Baku's cultural center [Pottmann 2010, fig. 9] (on the bottom an authors' elaboration).

## Conclusions

The tools for creating digital models make it possible to intuitively manage geometric complexity, allowing a dialogue with increasingly arbitrary and customizable shapes. Nowadays technologies' progress in models construction therefore has a direct influence on the shape definition process, facilitating the creative–compositional moment and transferring to it the dynamism and deformation inherent in the tools. However, the case study shows how the free–form project, if led accordingly to the described method, facilitates formal control on the one hand and increases the difficulties associated with the construction phase on the other: thus, it enlarges the discrepancy between the geometric conception of form and its engineering.
Today's challenge is therefore to solve a multidisciplinary problem, which can be expressed in the relationship between geometry and structure, but also and above all in the relationship between form and its meaning. Among the designer's goals, fundamental is that of designing quality forms, namely aesthetically valid and appreciable shapes, because cultural, social and symbolic values are connected to the formal meaning, which makes architecture an indelible expression of its time. Before any distributive, functional, constructive need, a project arises in the space of mind as an image: the transformation induced by digital modeling tools is the one that leads a space of mind traditionally tied to cartesian coordinates to become a place defined by forces and motion. It is a true revolution, a dynamic thinking, which puts topology as the genetic matrix of formal research. The project, yet in its embryonic conception, frees itself from quantities and distances, from deformation. Therefore, quality control is led by intervening on the curvature of a surface, point by point: indeed, reflection and shading derive from it, which are characteristics that allow to visually appreciate any material reality. It is an approach typical of the design field, transposed in its essential logic and its methodological principles to the scale of architecture, and facilitated by sub–d, because they enable to govern complex shapes while maintaining a smooth and continuous curvature graph. The digital tool is therefore undoubtedly a necessary means to control the complexity of freeforms, but not sufficient to guarantee their quality, for which the formal research, in aesthetic, symbolic and expressive terms, is still inevitably left to the designer's awareness and sensitivity.

## Notes

[1] Mathematics classifies freeform surfaces within the invariant complex ones, underlining in their definition the absence of any translational and rotational symmetry. Therefore, it is impossible to connect them to codified relations or transformations.

[2] Topological properties are, for example, the condition of border or boundary, inside–outside, openness and closure, connectedness, and orientability.

[3] $\sigma = \lim_{n \to \infty} M^n$ where σ is the subdivision surface, $M^n$ is the nth subdivided control mesh and n is the number of iterations in the subdivision process.

[4] Therefore subdivision results in the definition of new vertices, calculated on a weighted average that considers the position of the initial vertices and data connected to faces and edges.

## Credits

In the general sharing of the methodology and content, Leonardo Baglioni was responsible for the general setting of the research, Lucrezia Di Marzio was involved in its development and experimental phase.

## References

De Luca F. (2006). *Modelli architettonici: Dagli strumenti della progettazione alla progettazione degli strumenti. Il modello come strumento progettuale in ambito digitale informatico*. PhD thesis in Composizione Architettonica, tutor prof. Antonino Saggio. University of Roma La Sapienza.

DeRose T., Kass M., Truong T. (1998). Subdivision Surfaces in Character Animation. In *ACM SIGGRAPH 98. Electronic Art and Animation Catalog. Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 85-94. New York, USA: Association for Computing Machinery.

Dragišić M., Bnin-Bninski A. (2017). The application models of the topological principle of continuous deformation in the architectural design process. In *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 453-464.

Eigensatz M., Kilian M., Schiftner A., Mitra N.J., Pottmann H., Pauly M. (2010). Paneling Architectural Freeform Surfaces. In *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 29, No. 4, pp. 1-10.

Emmer M. (Ed.). (2005). *Matematica e cultura*. Milan: Springer.

Froli M., Tonelli D. (2014). Progettare involucri di forma libera: l'ingegnerizzazione dell'involucro. In *Costruzioni Metalliche*, Vol. LXVI, No. 3, pp. 44-55.

Harada T., Yoshimoto F., Moriyama M. (1999). An aesthetic curve in the field of industrial design. In *Proceedings 1999 IEEE Symposium on Visual Languages. Tokyo, 13-16 September 1999*, pp. 38-47. Piscataway: IEEE.

Liao W., Li T., Liu H. (2017). *Subdivision Surface Modeling Technology*. Singapore: Springer Singapore.

Migliari R. (Ed.). (2004). *Disegno come modello: Riflessioni sul disegno nell'era dell'informatica*. Rome: Edizioni Kappa.

Pottmann H., Asperl A., Hofer M., Kilian M. (Eds.). (2007). *Architectural Geometry*. Bentley Institute Press.

Sanchez-Alvarez, J. (2010). Practical aspects determining the modelling of the space structure for the free-form envelope enclosing Baku's Heydar Aliyev Cultural Centre. In A. Domingo, C. Lazaro (Eds.). *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures*. Valencia 28 September - 2 October 2009, pp. 1263-1274. Valencia: University of Valencia.

Tellier X. (2020). *Morphogenesis of curved structural envelopes under fabrication constraints*. PhD thesis in Science, Ingénierie et Environnement, tutor prof. H. Pottman. University of Paris-Est.

Tonelli D. (March 2012). *Sinossi sull'ingegneria delle forme libere*. <http://www2.ing.unipi.it/griff/files/Sinossi.pdf > (accessed 29 January 2023).

Winchester H. (15 October 2019). *Zaha Hadid Architects on the tech behind its iconic designs*. <https://www.chaos.com/blog/zaha-hadid-architects-on-the-tech-behind-its-iconic-designs> (accessed 29 January 2023).

Authors
*Leonardo Baglioni,* Sapienza Università di Roma, leonardo.baglioni@uniroma1.it
*Lucrezia Di Marzio*, Sapienza Università di Roma, dimarzio.lucrezia@gmail.com

*To cite this chapter*: Baglioni Leonardo, Di Marzio Lucrezia (2023). Il controllo della forma nelle superfici libere dell'architettura contemporanea/Formal Control for Freeform Surfaces of Contemporary Architecture. In Cannella M., Garozzo A., Morena S. (Eds.). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 793-809.

 Isbn 9788835155119